

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

О.В. Донець, Ю.С. Калиниченко, М.І. Шпіка

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання курсового проекту з дисципліни

"Системи керування електроприводами"

(для студентів 4 курсу всіх форм навчання напряму підготовки

6.050702 – "Електромеханіка")

Харків – ХНАМГ – 2008

Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни "Системи керування електроприводами" (для студентів 4 курсу всіх форм навчання напрямку підготовки 6.050702 – "Електромеханіка") / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: О.В. Донець, Ю.С. Калиниченко, М.І. Шпіка – Х.: ХНАМГ, 2008. - 39 с.

Укладачі: О.В. Донець,
Ю.С. Калиниченко,
М.І. Шпіка.

Рецензент: В.П. Андрійченко

Рекомендовано кафедрою електричного транспорту,
протокол № 2 від 9 вересня 2008 р.

Завдання на курсовий проект

Мета курсового проекту – привити студентам навички системного підходу при проектуванні сучасної багаторівневої мікропроцесорної системи керування асинхронного електроприводу з кількома інверторами напруги та асинхронними короткозамкнутими електродвигунами. Тому перед студентами ставиться завдання не просто освоїти методику розрахунку тих чи інших схемних рішень або ланцюгів керування, (наприклад, перетворювача частоти), а на основі технічних вимог та вихідних даних вибрати структуру електроприводу, зробити розрахунок його статичних характеристик та вибрати закони керування, розробити структуру багаторівневої мікропроцесорної системи керування та здійснити вибір її елементів, провести розрахунок параметрів зворотних зв'язків та вибір регуляторів, розробити протоколи обміну цифрових каналів зв'язку та алгоритми керування, зробити опис роботи системи керування. Причому, студенти повинні обґрунтовувати свій вибір технічних рішень.

Виконання курсового проекту дозволить студентам суттєво розширити свій технічний кругозір та підготуватися до виконання дипломного проекту.

В якості об'єкту керування можна використати, наприклад, асинхронний електродвигун тягового електроприводу рухомого складу міського електротранспорту.

До вихідних даних входять:

$P_{\text{пит}}$ – питома потужність електроприводу;

n – кількість електродвигунів електроприводу;

$i_{\text{ред}}$ – передавальне число редуктора;

$\eta_{\text{ред}}$ – ККД редуктора;

m – приведена маса рухомого складу;

V_{max} – максимальна швидкість рухомого складу;

G – вага рухомого складу;

a_{max} – максимальне прискорення рухомого складу;

W – сила опору руху рухомого складу;

D_k – діаметр колеса;

U_d – напруга живильної мережі;

$\eta_{\text{інв}}$ – ККД інвертора;

$\eta_{\text{дв}}$ – ККД тягового асинхронного електродвигуна;

I_f – діюче значення струму тягового асинхронного електродвигуна;

$Z_{\text{рот}}$ – кількість зубів ротора для датчиків імпульсів.

В курсовому проекті необхідно:

- на основі технічних вимог та вихідних даних зробити вибір структури тягового асинхронного електропривода;
- зробити розрахунок статичних характеристик електропривода та вибрати закони керування;
- розробити структуру багаторівневої мікропроцесорної системи керування та здійснити вибір її елементів;
- провести розрахунок параметрів зворотних зв'язків та вибір регуляторів;
- розробити протоколи обміну цифрових каналів зв'язку та алгоритми керування;
- зробити опис роботи системи керування.

Завдання на проектування наведені в Додатку (стор.36-37).

Зміст пояснювальної записки

Розрахунково-пояснювальна записка повинна містити:

1. Титульний аркуш за затвердженою в Академії формою.
2. Завдання на проектування.
3. Реферат.
4. Зміст.
5. Вступ.
6. Головна частина, що містить розділи роботи відповідно до пунктів.

7. Висновки.

8. Список використаної літератури.

Вступ має містити оцінку сучасного стану вирішуваної проблеми.

У висновках необхідно дати коротку оцінку одержаних результатів.

В головній частині необхідно навести: структуру системи керування, схеми регуляторів та зворотних зв'язків, таблиці протоколів обміну цифрових каналів зв'язку, алгоритми керування та опис роботи системи керування.

Обсяг розрахунково-пояснювальної записки складає 25 – 30 сторінок.

В графічній частині необхідно навести: статичні характеристики електроприводу, структурну схему електроприводу з мікропроцесорною системою керування та функціональну схему системи автоматичного регулювання заданих параметрів.

Вимоги до оформлення курсової роботи

Оформлення курсової роботи проводять відповідно до вимог ЄСКД і нормативних документів з оформлення.

Вступ

Сучасний електропривод представляє собою автоматизовану систему, що складається з електродвигуна, силового перетворювача і, як правило, мікропроцесорної системи керування. Він забезпечує перетворення електричної енергії в механічну відповідно до заданого алгоритму. Сфера застосування електричного приводу в промисловості, на транспорті та в побуті постійно розширюється. В даний час більше 60% всієї виробленої у світі електричної енергії споживають електричні двигуни. Звідси й можна зробити висновок, що ефективність енергозберігаючих технологій значною мірою визначають ефективністю електропривода. Розробка високопродуктивних, компактних й економічних систем приводу є пріоритетним напрямком розвитку сучасної техніки.

Аналіз продукції провідних світових виробників систем електроприводу дозволяє зробити висновок, що неухильно зростає частка систем приводу з двигунами змінного струму. У більшості таких електроприводів використовують асинхронні електродвигуни з короткозамкнутим ротором. Це пов'язано, в першу чергу, з низькою надійністю щітково-колекторного вузла двигунів постійного струму й більш високою їх вартістю в порівнянні із двигунами змінного струму, а також у зв'язку зі значним зниженням цін на статичні перетворювачі частоти.

Останній час ознаменувався значними успіхами в галузі силової електроніки та мікропроцесорної техніки. Було освоєно промислове виробництво біполярних транзисторів (IGBT) з ізольованим затвором та силових модулів на їхній основі, а також силових інтелектуальних модулів (IPM) з вбудованими засобами захисту ключів та інтерфейсами для безпосереднього підключення до мікропроцесорних систем керування.

Ріст ступеня інтеграції в мікропроцесорній техніці й перехід від мікропроцесорів до мікроконтролерів з вбудованим набором спеціалізованих периферійних пристроїв, зробили необоротною тенденцією масової заміни

аналогових систем керування приводами на системи прямого цифрового керування.

Задані характеристики електроприводу підтримуються мікропроцесорною системою керування на протязі всього терміну роботи, а, при необхідності, можуть корегуватись шляхом вдосконалення алгоритмів керування на програмному рівні. Це дозволяє, не змінюючи структури системи керування, покращувати її ефективність, а в кінцевому рахунку – збільшити термін роботи електрообладнання та знизити експлуатаційні затрати. Крім того, використання мікропроцесорної системи керування забезпечує ефективну систему діагностики електроприводу.

Система керування, яка запроектована в даному курсовому проєкті, призначена для реалізації режимів роботи тягового асинхронного електроприводу.

Систему керування виконують на мікроконтролерах з використанням цифрових каналів зв'язку між пультом керування, мікропроцесорною системою керування та системою керування інвертора напруги.

Використання цифрових каналів зв'язку дозволяє підвищити надійність передачі інформації, а застосування мікроконтролерів – забезпечує високу точність регулювання заданих параметрів.

1. Технічні вимоги до системи керування

Система керування призначена для роботи в складі асинхронного електроприводу.

Система керування повинна виконуватись на основі мікроконтролерів та забезпечувати наступні режими роботи електроприводу:

- рух;
- гальмування;
- вибіг.

Система керування повинна формувати наступні характеристики електроприводу:

- постійної сили (моменту);
- постійної потужності;
- постійної швидкості (частоти обертання).

Система керування повинна забезпечити діапазон регулювання:

- швидкості від нульової до V_{\max} ;
- прискорення від нульового до a_{\max} .

Зв'язок між пультом керування, мікропроцесорною системою керування та системами керування інверторами напруги повинен здійснюватись цифровими каналами зв'язку.

Система керування повинна забезпечувати:

- високу надійність роботи електроприводу;
- діагностику роботи електроприводу;
- відображення на пульті керування основних параметрів електроприводу

та систем його захисту.

Пульт керування, мікропроцесорна система керування та системи керування інверторами напруги повинні постачатись від бортової мережі живлення.

2. Структурні схеми електроприводу

Для прикладу розглянемо тяговий електропривод з чотирма асинхронними електродвигунами (ТАД), який живиться від мережі постійного струму. Для такого електроприводу можна виділити три основні структурні схеми:

- з одним автономним інвертором напруги;
- з двома автономними інверторами напруги;
- з чотирма автономними інверторами напруги.

На рис. 2.1 наведена структурна схема електроприводу з одним автономним інвертором напруги для усіх тягових електродвигунів.

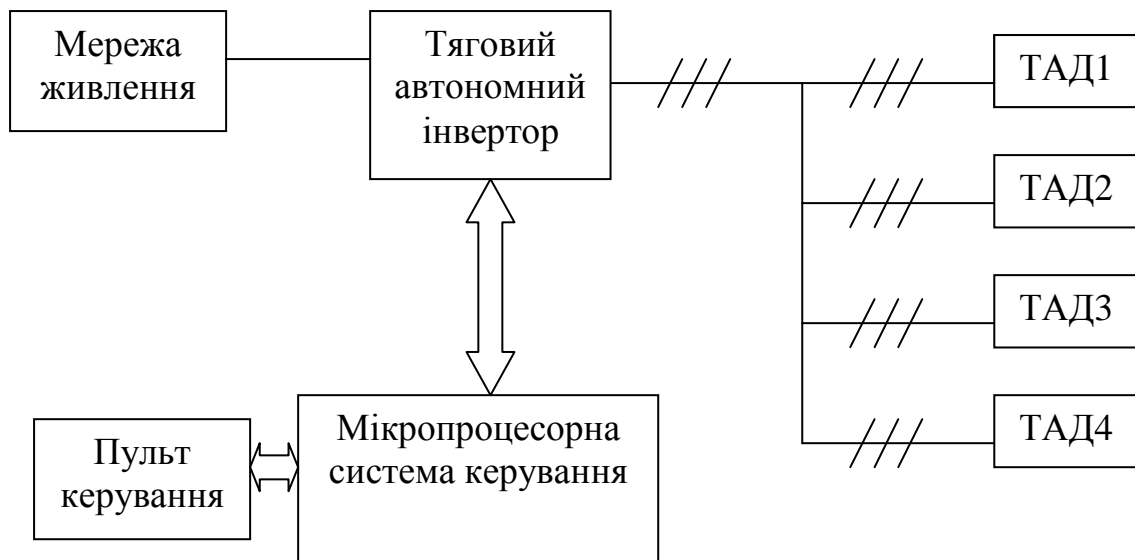


Рис. 2.1 – Структурна схема електроприводу з одним автономним інвертором напруги

Така схема забезпечує високі масо-габаритні показники щодо електричного обладнання, але має вагомий недолік – у випадку виходу з ладу автономного інвертора напруги або відмови в його системі керування – виключається можливість роботи електричного приводу. Тому схема електроприводу з одним автономним інвертором напруги не знайшла широкого використання в якості тягового.

Більш доцільною (з точки зору надійності й оптимальних масо-габаритних показників) є структурна схема електричного приводу, в якій від одного автономного інвертора напруги живиться два тягових електродвигуни. Така схема наведена на рис. 2.2 .

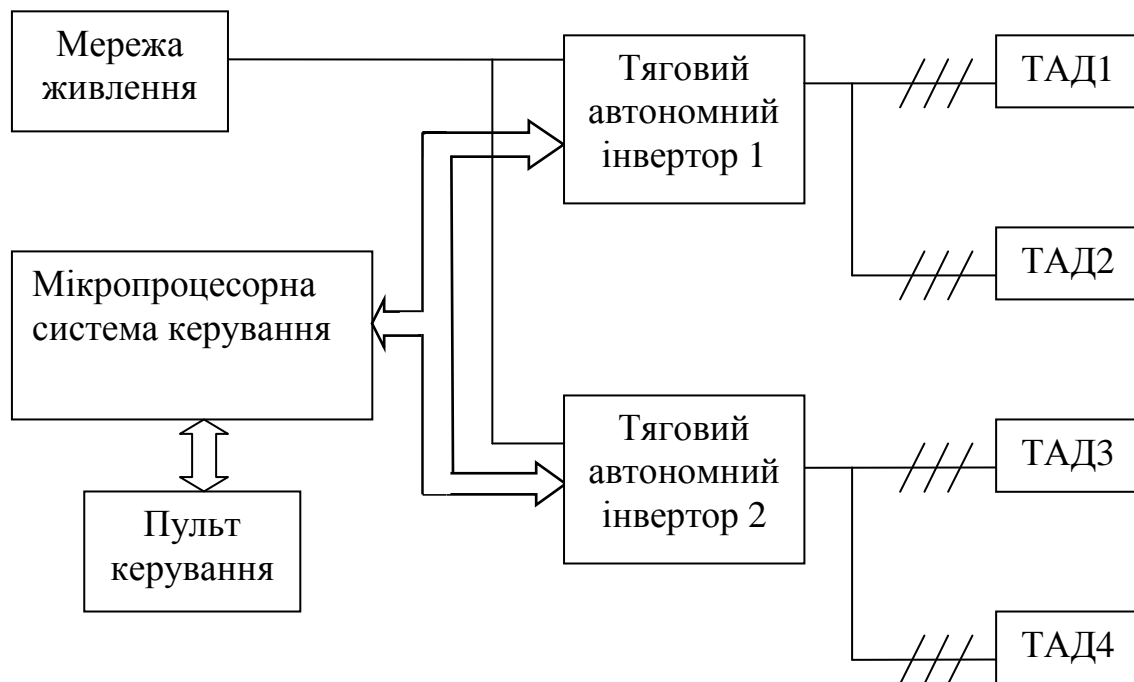


Рис. 2.2 – Структурна схема електроприводу з одним автономним інвертором напруги на два електродвигуни

В цьому випадку при відмові одного з двох інверторів 50 % тягової потужності зберігається і рухомий склад може (без пасажирів) пересуватися в депо самостійно, що виключає затримку руху на лінії.

Недоліком такої структури є те, що у випадку виходу з ладу одного автономного інвертора напруги тільки 50 % тягової потужності зберігається, що не дозволяє перевозити пасажирів.

Найбільш надійною є структура електричного приводу з індивідуальними автономними інверторами напруги на кожен тяговий електродвигун (рис. 2.3). За такої структури в разі відмови одного автономного інвертора напруги потужність електроприводу знижується лише на 25 %, що дозволяє пересуватися рухомому складу з мінімальними втратами потужності.

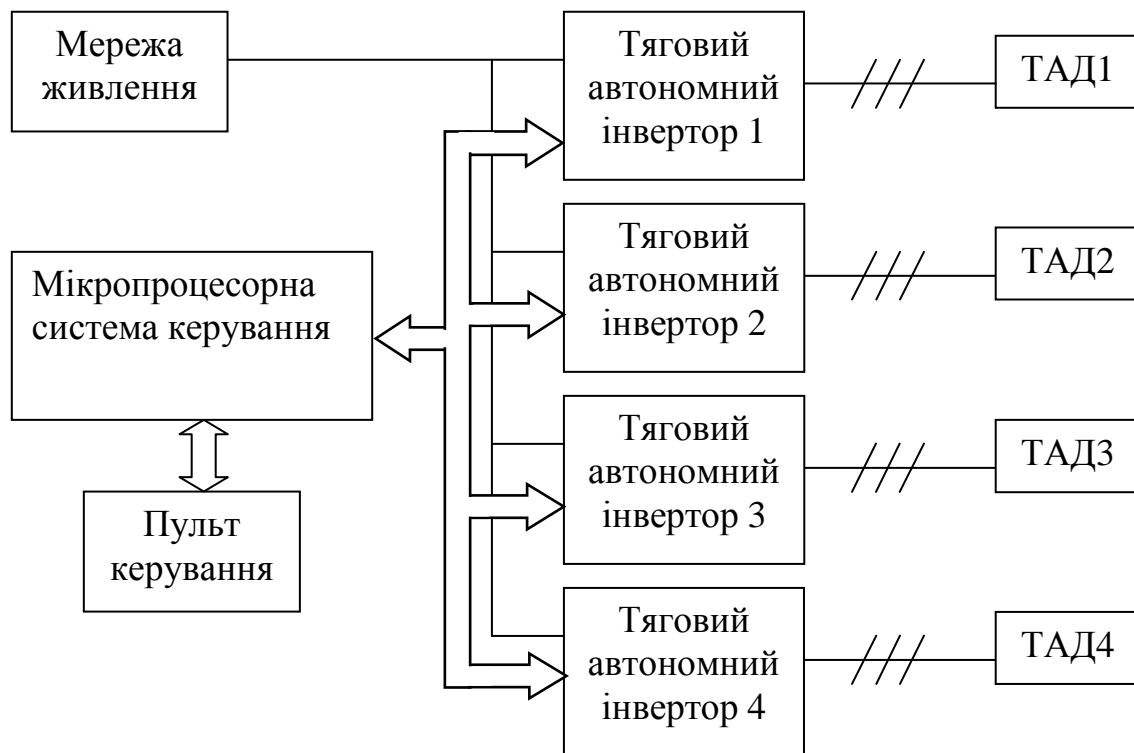


Рис. 2.3 – Структурна схема електроприводу з індивідуальними автономними інверторами напруги

До недоліків такої схеми слід віднести гірші масо-габаритні показники електричного обладнання.

3. Статичні характеристики електроприводу

Статичні характеристики електроприводу для тягового та гальмівного режимів можна розрахувати, використовуючи основні положення теорії електричної тяги. При розрахунках всі розмірності приводити в системі СІ.

Сила тяги витрачається на подолання сили опору руху рухомого складу та забезпечення йому заданого прискорення:

$$F = m * a + W, \quad (3.1)$$

де m – приведена маса рухомого складу;

a – задане прискорення рухомого складу;

W – сила опору руху рухомого складу.

Максимальна сила тяги дорівнює:

$$F_{\max} = m * a_{\max} + W, \quad (3.2)$$

де a_{\max} – максимальне прискорення рухомого складу.

Потужність електроприводу дорівнює:

$$P = P_{\text{пит}} * G, \quad (3.3)$$

де $P_{\text{пит}}$ – питома потужність електроприводу;

G – вага рухомого складу.

Потужність тягового електродвигуна:

$$P_{\text{дв}} = P / n, \quad (3.4)$$

де n – кількість електродвигунів електроприводу.

Мінімальну швидкість руху рухомого складу з максимальним тяговим зусиллям при номінальному навантаженні можна прийняти рівною:

$$V_1 = V_{\min}, \quad (3.5)$$

де $V_{\min} = 5$ км/ГОД.

Максимальна швидкість рухомого складу з максимальним тяговим зусиллям при номінальному навантаженні:

$$V_2 = 3,6 * n * P_{\text{дв}} * \eta_{\text{ред}} / F_{\max}, \quad (3.6)$$

де $\eta_{\text{ред}}$ – ККД редуктора.

Для забезпечення незмінного тягового зусилля (при $V_1 \geq V \geq V_2$) треба дотримуватись закону керування:

$$U_1/f_1 = \text{const.} \quad (3.7)$$

Подальше формування тягової характеристики (при $V > V_2$) відбувається при незмінній потужності електроприводу. При цьому сила тяги дорівнює:

$$F = 3,6 * n * P_{\text{дв}} * \eta_{\text{ред}} / V. \quad (3.8)$$

Для забезпечення незмінної потужності електроприводу треба додержуватись закону керування:

$$U_1/\sqrt{f_1} = \text{const.} \quad (3.9)$$

Для забезпечення незмінної швидкості рухомого складу потрібно додержуватись закону керування:

$$V = \text{const.} \quad (3.10)$$

На основі (3.5), (3.6) та (3.8) можна розрахувати та побудувати граничну тягову характеристику.

Для розрахунку та побудови механічної характеристики електроприводу, яка повинна формуватися системою керування, можна скористатися формулами:

$$M = F * D_k / (2 * i_{\text{ред}} * \eta_{\text{ред}}), \quad (3.11)$$

$$n_{\text{дв}} = 60 * i_{\text{ред}} * V / (3,6 * \pi * D_k), \quad (3.12)$$

$$M = P_{\text{дв}} * \pi * n_{\text{дв}} / 30, \quad (3.13)$$

$$i_{\text{ред}} = 3,6 * \pi * D_k * n_{\text{дв max}} / (V_{\text{max}} * 60), \quad (3.14)$$

$$\omega = 2 * \pi * n_{\text{дв}} / 60, \quad (3.15)$$

де D_k – діаметр колеса;

$i_{ред}$ – передавальне число редуктора;

V_{max} – максимальна швидкість рухомого складу;

$n_{дв max}$ – максимальні оберти електродвигуна;

ω – частота обертання електродвигуна.

При розрахунку та побудові гальмівної характеристики рухомого складу можна прийняти:

$$B_{max} = (1 \dots 1,2) F_{max}, \quad (3.16)$$

$$V_{гальм1} = V_{min}, \quad (3.17)$$

де B_{max} – максимальна сила гальмування;

$V_{гальм1}$ – мінімальна швидкість руху рухомого складу з максимальним гальмівним зусиллям при номінальному навантаженні.

Звідки максимальна швидкість руху рухомого складу з максимальним гальмівним зусиллям при номінальному навантаженні:

$$V_{гальм2} = 3,6 * n_{дв} / (B_{max} * \eta_{ред}). \quad (3.18)$$

Подальше формування гальмівної характеристики (при $V > V_{гальм2}$) відбувається при незмінній потужності електроприводу. При цьому сила гальмування дорівнює:

$$B = 3,6 * n_{дв} * P_{дв} / (V * \eta_{ред}). \quad (3.19)$$

Гальмівний момент на валу електродвигуна дорівнює:

$$M_{гальм} = B * \eta_{ред} * D_k / (2 * i_{ред}). \quad (3.20)$$

Механічні характеристики електроприводу у відносних одиницях наведені на рис. 3.1.

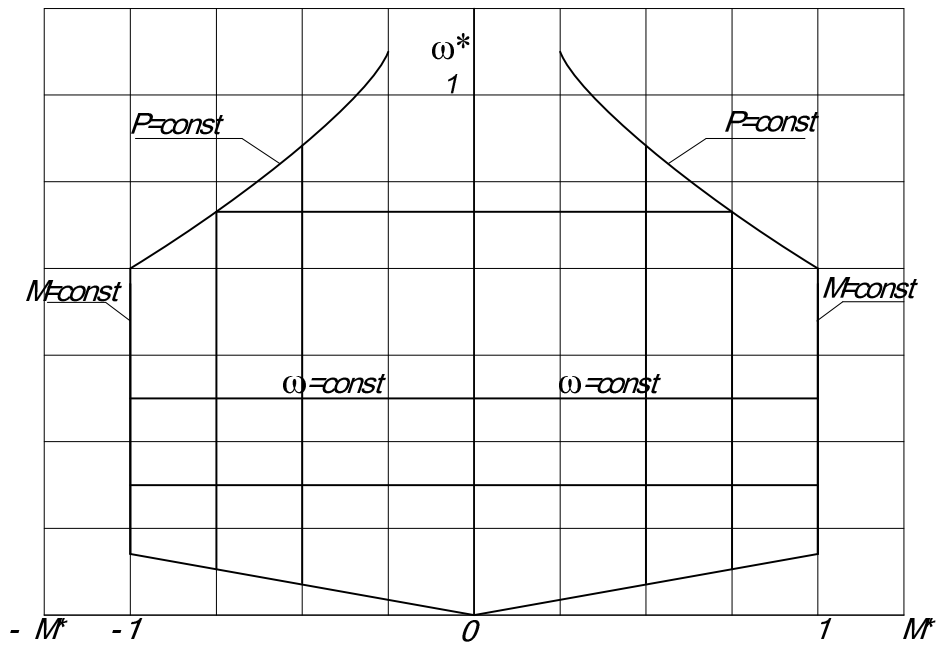


Рис. 3.1 – Механічні характеристики електроприводу

4. Структура системи керування

Для прикладу розглянемо структурну схему системи керування асинхронним електроприводом з одним електродвигуном (рис. 4.1).

До складу системи керування електроприводом входять:

- пульт керування;
- мікропроцесорна система керування;
- системи керування інвертором напруги;
- датчик постійної напруги;
- датчик постійного струму;
- датчики змінного струму за числом фаз;
- датчик обертів електродвигуна;
- монітор.

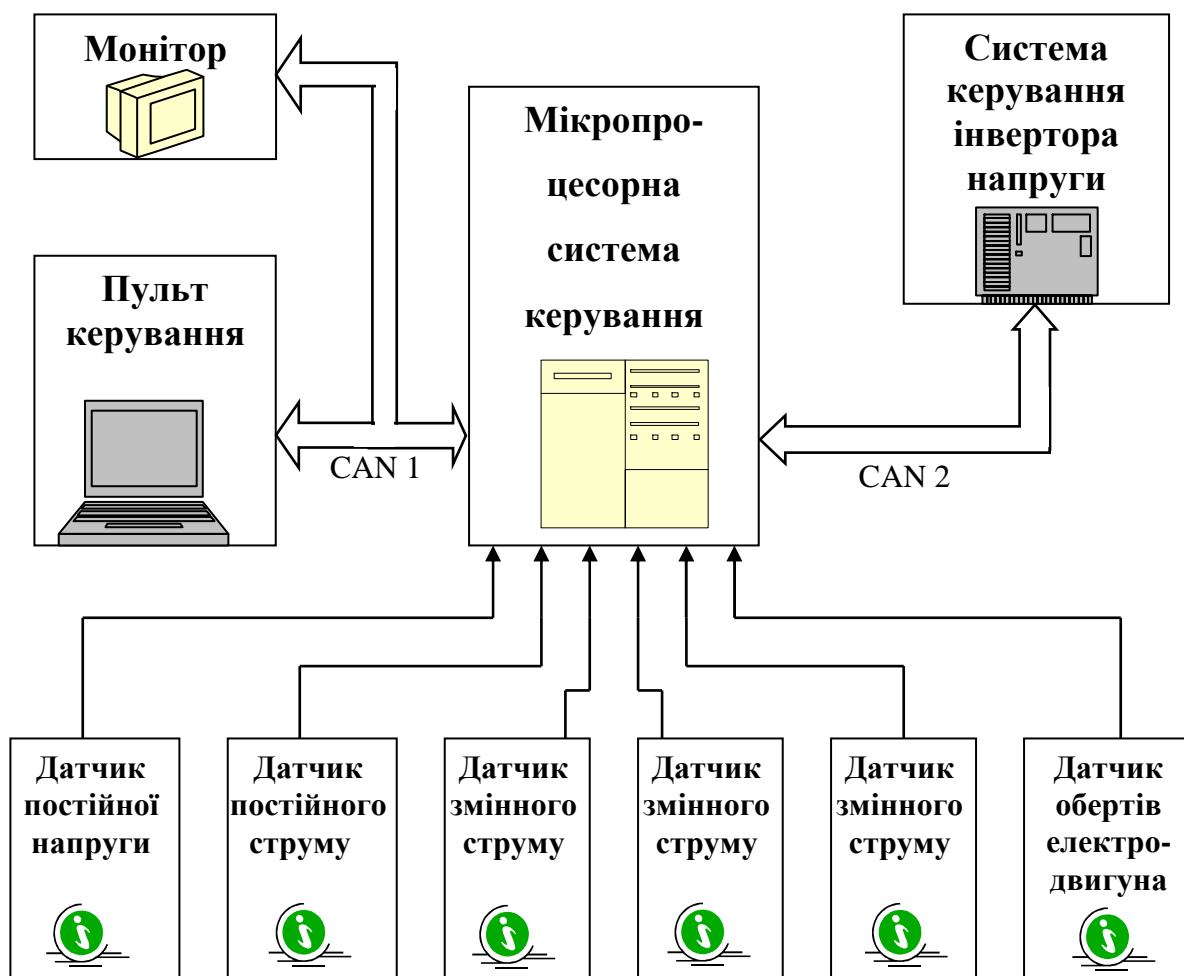


Рис. 4.1 – Структурна схема системи керування

Система керування асинхронним електроприводом підпорядкована і складається з трьох рівнів. Найвищу ієрархію має пульт керування. На другому рівні знаходиться мікропроцесорна система керування. Системи керування інвертора напруги має найнижчий третій рівень. Це умовно позначається таким чином: пульт керування – Master для мікропроцесорної системи керування, а вона для нього – Slave. В свою чергу мікропроцесорна система керування – Master для системи керування інвертора напруги, а остання – Slave для першої.

Зв'язок між пультом керування та мікропроцесорною системою керування здійснюють цифровим каналом зв'язку CAN1, а зв'язок між мікропроцесорною системою керування та системою керування інвертора напруги – цифровим каналом зв'язку CAN2.

Датчики постійної напруги та постійного струму необхідні для формування зворотного зв'язку за потужністю.

Датчики змінного струму необхідні для формування зворотного зв'язку з фазного струму.

Датчик обертів електродвигуна необхідний для частотного каналу.

Монітор відображає режим роботи електроприводу.

5. Опис роботи системи керування

Основні вимоги, які необхідно враховувати при описі роботи системи керування електроприводом, наведені нижче.

Перш за все необхідно привести систему керування в робочий стан, задати напрям руху, режим роботи та інтенсивність розгону електроприводу.

Для заборони несанкціонованого включення системи керування, на пульті керування треба передбачити ключ. Після його включення оператор має можливість перевести систему керування в робочий стан та забезпечити режим електроприводу «Рух».

Режим «Рух» треба здійснювати з пульту керування за допомогою контролера керування. Для переходу в режим «Рух» необхідно встановити реверсор в положення «Вперед» («Назад») та перевести контролер керування в одне з тягових положень.

Для переходу в режим «Вибіг» контролер керування на пульті встановлюють у нейтральне положення.

Для забезпечення режиму «Гальмування», контролер керування переводять на одну з гальмівних позицій.

Для реверсування електроприводу необхідно виконати наступні умови:

- двигун повністю зупинити;
- контролер керування перевести в нейтральне положення.

Після виконання цих умов реверсивну рукоятку переводять із стану « Вперед » в стан « Назад » або навпаки.

Для підтримання швидкості перемикач «Швидкість» встановлюють в одне з положень, що відповідає потрібній швидкості. Швидкість може підтримуватися в діапазоні 0 – 60 км/год. При максимальному положенні перемикача «Швидкість» – канал регулювання швидкості не працює.

Алгоритми керування повинні передбачати автоматичний процес збору електричної схеми для заданого режиму та регулювання параметрів за заданим законом.

6. Вибір регуляторів та розрахунок параметрів зворотних зв'язків

Вибір регуляторів та розрахунок параметрів зворотних зв'язків розглянемо на прикладі регулятора напруги інвертора.

На рисунку 6.1 наведена функціональна схема регулятора напруги інвертора.

Для забезпечення формування механічної характеристики електроприводу, наведеної на рисунку 3.1, в регуляторі напруги інвертора необхідно передбачити три канали регулювання:

- струму;
- потужності;
- швидкості.

Кожний канал, в свою чергу, повинен мати задавач інтенсивності (ЗІ1, ЗІ2, ЗІ3) та пропорційно - інтегральний регулятор (ПІ- регулятор) або пропорційно - інтегрально-диференціальний регулятор (ПІД- регулятор).

Задавач інтенсивності служить для одержання необхідного закону зміни в часі сигналу керування, який задають.

Схемою мінімуму вибирають мінімальний з трьох вихідних сигналів регуляторів. Працює канал, в якого на виході регулятора – найменший сигнал.

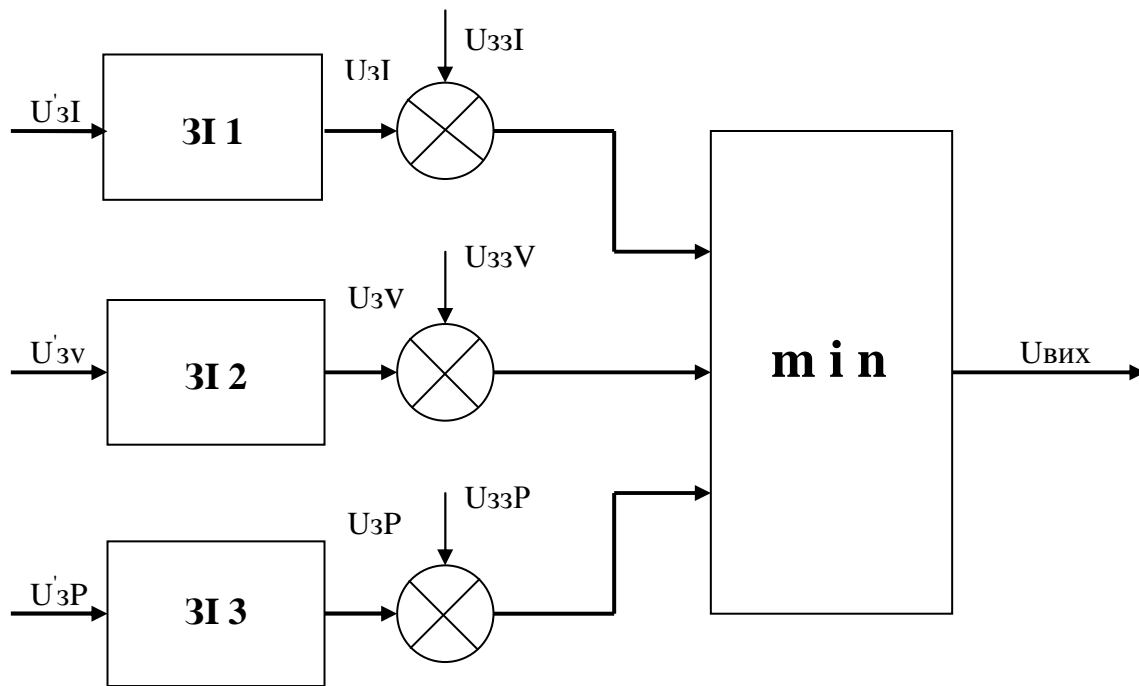


Рис 6.1 – Функціональна схема регулятора напруги інвертора

Після подачі сигналу керування, в перший момент часу, зворотний зв'язок від датчиків – відсутній, система регулювання – розімкнута. Зі зростанням зворотних зв'язків мікропроцесорна система керування забезпечує регулювання пускового струму та моменту (рис. 3.1). Тобто, в пусковому режимі спочатку працює канал регулювання струму, а по мірі розгону електроприводу – здійснюється автоматичний перехід в канал регулювання потужності або швидкості.

На рис. 6.2 наведена структурна схема ПІ- регулятора.

ПІ- регулятор складається з пропорційного та інтегрального регуляторів, включених паралельно. ПІ- регулятор виробляє вихідний сигнал, що є сумою пропорційної та інтегральної складових частин від похибки регулювання:

$$U_{вих}(p) = (K_p + K_i/p) * U_{вх}(p), \quad (6.1)$$

$$K_i = 1/ T_i, \quad (6.2)$$

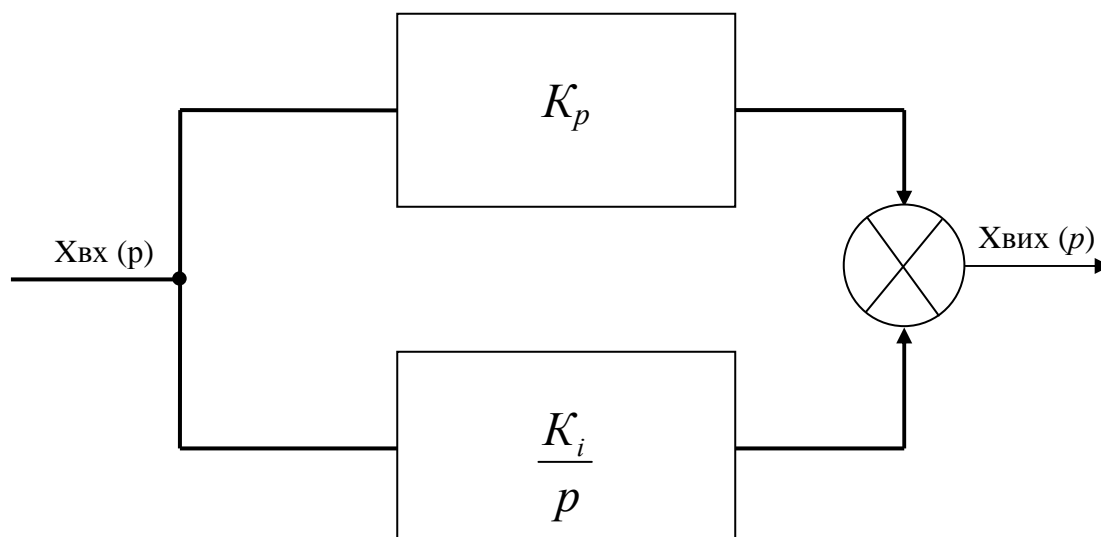


Рис. 6.2 – Структурна схема ПІ- регулятора

де K_p – коефіцієнт посилення регулятора;

T_i – постійна часу інтегрування.

На рис. 6.3 наведена структурна схема ПД- регулятора.

ПД- регулятор складається з пропорційного, інтегрального та диференціального регуляторів, включених паралельно.

ПД- регулятор виробляє вихідний сигнал, що є сумою пропорційної, інтегральної та диференціальної складових частин від похибки регулювання:

$$U_{\text{вих}}(p) = (K_p + K_i/p + T_d * p) * U_{\text{вх}}(p), \quad (6.3)$$

де T_d – постійна часу диференціювання.

Складові ПД- регулятора можна розглянути, використовуючи операційні підсилювачі.

На рис. 6.4 наведений підсилювач напруги з інвертованим вихідним сигналом, на базі якого можна виконати пропорційний регулятор.

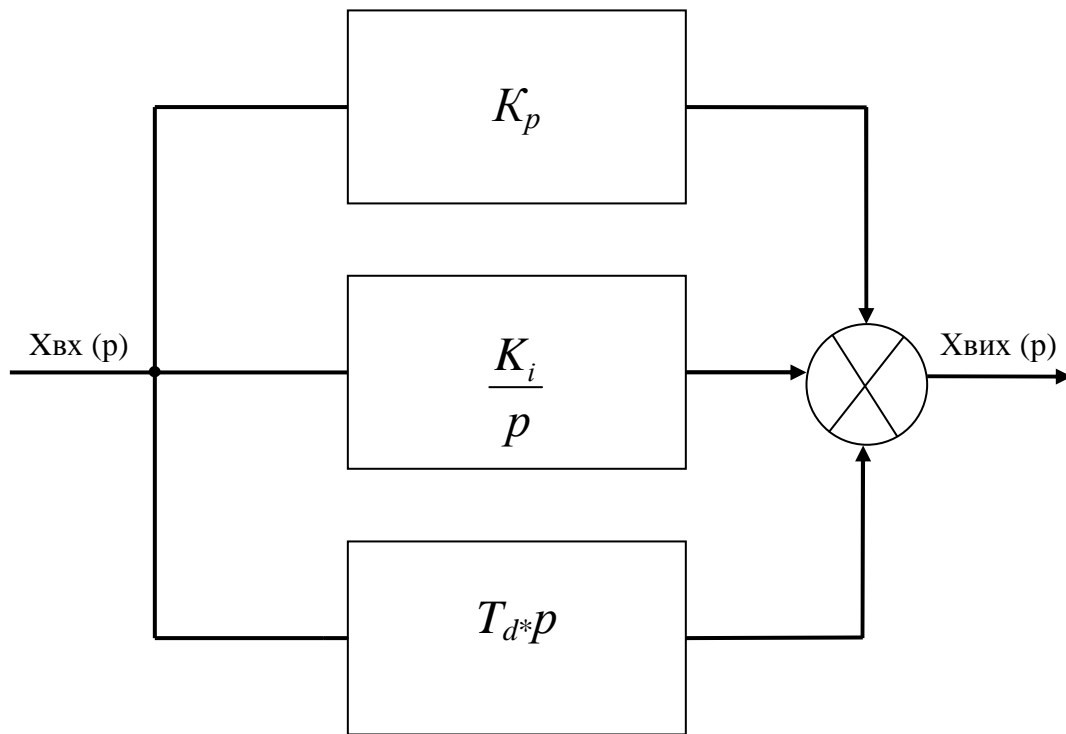


Рис. 6.3 – Структурна схема ПІД- регулятора

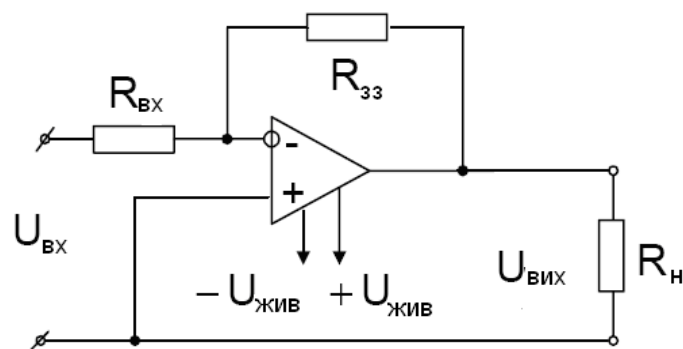


Рис. 6.4 – Підсилювач напруги

Вихідний сигнал такого підсилювача дорівнює:

$$U_{\text{ВИХ}} = - (R_{33} / R_{\text{ВХ}}) * U_{\text{ВХ}}, \quad (6.4)$$

або

$$U_{\text{ВИХ}} = - K * U_{\text{ВХ}}, \quad (6.5)$$

де R_{33} – опір резистора зворотного зв'язку;

$R_{ВХ}$ – опір вхідного резистора;

K – коефіцієнт підсилення.

На рис. 6.5 наведений інтегральний підсилювач з інвертованим вихідним сигналом, на базі якого можна виконати інтегральний регулятор.

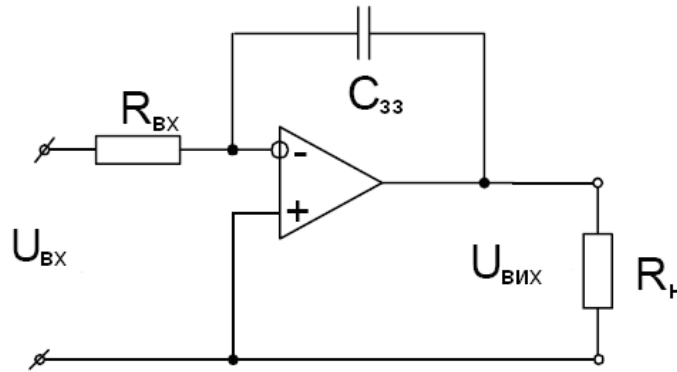


Рис. 6.5 – Інтегральний підсилювач

Вихідний сигнал такого підсилювача дорівнює:

$$U_{ВІХ} = -(1 / (R_{ВХ} * C_{33})) \int U_{ВХ} * dt \quad (6.6)$$

На рис. 6.6 наведений диференціальний підсилювач з інвертованим вихідним сигналом, на базі якого можна виконати диференціальний регулятор.

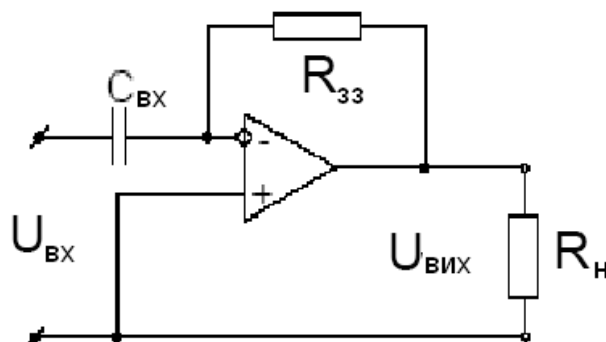


Рис. 6.6 – Диференціальний підсилювач

Вихідний сигнал такого підсилювача дорівнює:

$$U_{\text{вих}} = - R_{\text{вх}} * C_{\text{зз}} * dU_{\text{вх}} / dt. \quad (6.7)$$

Вказаний вище задавач інтенсивності можна представити аперіодичним елементом:

$$U_{\text{вих}}(p) = (1 / (T_{\text{зі}} * p + 1)) * U_{\text{вх}}(p) \quad (6.8)$$

де $T_{\text{зі}}$ – постійна часу задавача інтенсивності.

Для розрахунку параметрів зворотних зв'язків необхідно вибрати датчики напруги, струму, частоти обертання електродвигуна. Наприклад, для вимірювання напруги можна використовувати вимірювальний перетворювач напруги типу ПИНТ-1, для вимірювання струму – шунт на потрібний струм зі стандартним виходом 75мВ з вимірювальним перетворювачем напруги типу ПИНТ-1. Для вимірювання частоти обертання електродвигуна можна використовувати датчики типу НІА фірми HEINZMANN або типу KMG-2H фірми «Красс Маффай».

Якщо необхідно вимірювати напругу мережі живлення U_d , то використовують вхід вимірювального перетворювача напруги на 1000 В і вихід на 5 В.

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за напругою буде дорівнювати:

$$K_{U_d} = U_{\text{вих1}} / U_{\text{вх3}} \quad (6.9)$$

$$K_{U_d} = 5\text{В} / 1000\text{В} = 0,005\text{В/В}$$

Якщо необхідно вимірювати струм на вході інвертора напруги – використовують шунт (наприклад, на струм 300 А з виходом 75мВ) з вимірювальним перетворювачем напруги типу ПИНТ-1. В останнього використовують вхід на 75мВ та вихід на 5 В.

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за струмом буде дорівнювати:

$$K_{Id} = U_{вих1} / U_{вх1}, \quad (6.10)$$

$$K_{Id} = 5V / 300A = 0,016V/A.$$

Для одержання сигналу зворотного зв'язку за потужністю на вході інвертора напруги необхідно перемножити сигнали з датчиків напруги та струму.

Сама потужність на вході інвертора напруги дорівнює:

$$P_d = P_{дв} / (\eta_{дв} * \eta_{інв}), \quad (6.11)$$

де $\eta_{інв}$ – ККД інвертора;

$\eta_{дв}$ – ККД тягового асинхронного електродвигуна.

Параметри зворотних зв'язків щодо фазного струму асинхронного електродвигуна та частоті його обертання визначають аналогічно вищерозглянутим.

7. Алгоритми системи керування

При розгляді алгоритмів системи керування приймемо наступні умовні позначки:

F – релейний оператор, що формується в мікропроцесорній системі керування (МПСК);

S – логічний перемикач, що формується в МПСК;

J(1) – інформаційний сигнал каналу CAN1 (ПК – МПСК);

J(2) – інформаційний сигнал каналу CAN2 (МПСК – СКІН).

Вихідні сигнали від ПК до МПСК (CAN1):

J(1) $N_{км} = N0, N1, N2, N3$ - 4-х бітний код позиції контролера керування;

$J(1) F_{\text{рух}}$ – режим "Рух";
 $J(1) F_{\text{гальм}}$ – режим "Гальмування";
 $J(1) F_{\text{вибіг}}$ – режим "Вибіг";
 $J(1) F_{\text{в}}$ – рух "Вперед";
 $J(1) F_{\text{н}}$ – рух "Назад";
 $J(1) F_{\text{ін}}$ – дозвіл на включення інвертора.

Вихідні сигнали від МПСК до ПК (CAN1):

$J(1) I_{\text{ф}}$ – діюче значення струму електродвигуна;
 $J(1) V$ – швидкість об'єкту;
 $J(1) P$ – потужність електроприводу;
 $J(1) U_{\text{д}}$ – напруга мережі живлення;
 $J(1) I_{\text{д}}$ – активний струм на вході інвертора напруги.

Вихідні сигнали від МПСК до СКІН (CAN2):

$J(2) F_{\text{вп}}$ – завдання вихідної частоти для інвертора напруги;
 $J(2) U_{\text{вш}}$ – завдання глибини модуляції для інвертора напруги;
 $J(2) F_{\text{ін}}$ – команда на включення інвертора напруги;
 $J(2) F_{\text{в}}$ – команда рух "Вперед";
 $J(2) F_{\text{н}}$ – команда рух «Назад»;
 $J(2) F_{\text{гальм}}$ – режим "Гальмування".

Вихідні сигнали від СКІН до МПСК (CAN2):

$J(2) F_{\text{відм}}$ – відмова в роботі інвертора напруги;
 $J(2) F_{\text{гальмт}}$ включення гальмівного транзистора інвертора напруги.

Ключі перемикання режимів роботи електроприводу, які формуються в мікропроцесорній системі керування, наведені нижче. Для прикладу наведений варіант електроприводу з двома електродвигунами. Штрих над перемикачем або релейним оператором означає, що він має інверсне значення.

Режим "Рух":

$$S_{\text{рух}} = J(1)F_{\text{рух}} * (J(1)F_{\text{в}} \oplus J(1)F_{\text{н}}) * J(1)F_{\text{ін}} * (\bar{S}_{\text{ом1}} + \bar{S}_{\text{ом2}}), \quad (7.1)$$

де $\bar{S}_{\text{ом1}}$ – включений стан першого електродвигуна;

$\bar{S}_{\text{ом2}}$ – включений стан другого електродвигуна.

Режим "Гальмування":

$$S_{\text{гальм}} = J(1)F_{\text{гальм}} * (J(1)F_{\text{в}} \oplus J(1)F_{\text{н}}) * J(1)F_{\text{ін}} * \bar{S}_{\text{ом1}} * \bar{S}_{\text{ом2}}. \quad (7.2)$$

Режим "Вибіг":

$$S_{\text{вибіг}} = J(1)F_{\text{вибіг}} * (J(1)F_{\text{в}} \oplus J(1)F_{\text{н}}). \quad (7.3)$$

Команди керування, які формуються мікропроцесорною системою керування для СКІН, наведені для вищевказаного варіанта електроприводу.

Команда на включення тягового інвертора:

$$J(2)F_{\text{ін}} = J(1)F_{\text{ін}} * (J(1)F_{\text{рух}} + J(1)F_{\text{гальм}}) * (\bar{S}_{\text{ом1}} + \bar{S}_{\text{ом2}}). \quad (7.4)$$

Команда: рух "Вперед":

$$J(2)F_{\text{в}} = J(1)F_{\text{в}}. \quad (7.5)$$

Команда: рух «Назад»:

$$J(2)F_{\text{н}} = J(1)F_{\text{н}}. \quad (7.6)$$

Аналогічно можна записати й інші команди.

8. Цифрові канали зв'язку

В цифрових каналах зв'язку використовують CAN – протокол, що був розроблений фірмою Robert Bosch GmbH для автомобільної промисловості.

CAN – протокол відрізняється підвищеною перешкодостійкістю, надійністю і має такі властивості:

- дозволяє отримувати повідомлення всіма вузлами з синхронізацією в часі;
- забезпечує арбітраж доступу до шини;
- виявляє похибки і передає сигнали щодо них;
- забезпечує автоматичну передачу повідомлень при отриманні можливості повторного доступу до шини;
- розрізняє випадкові похибки від постійних відмов;
- забезпечує роботу по витій парі на відстані до 1 км.

Всі ці якості роблять CAN – протокол доволі привабливим для використання при розробці нових проектів. Тим більше, що ряд фірм випускають недорогі контролери, котрі апаратно реалізують вимоги CAN – протоколу і працюють в широкому температурному діапазоні.

CAN – протокол має наступні рівні:

- об'єктний рівень, що забезпечує фільтрацію та обробку повідомлень і стану;
- транспортний рівень, що представляє собою ядро CAN – протоколу. Він відповідає за синхронізацію, арбітраж, доступ до шини, розподіл посилок на фрейми, визначення й передачу похибок і мінімізацію несправностей.
- фізичний рівень визначає, як саме будуть передаватися сигнали, їх електричні рівні й швидкість передачі.

Фізичний рівень визначають стандартом ISO 11898.

Диференційне вмикання прийомопередавачів забезпечує затухання синфазної перешкоди. При цьому рівень сигналів складає третину від значення напруги живлення. Саму напругу живлення не визначають жорстко.

Для створення CAN – протоколу необхідно розробити протокол обміну між Master і Slave.

Приклад такого протоколу обміну між пультом керування (ПК) та мікропроцесорною системою керування (МПСК) наведений в таблиці 8.1. Аналогічний вигляд має протокол обміну між МПСК та системою керування інвертора напруги (СКІН).

Таблиця 8.1 – Протокол обміну між пультом керування та мікропроцесорною системою керування

№ п/п	Параметр	Одиниця виміру	Інформаційний зміст	Джерело
1	2	3	4	5
1.	I_ϕ	1 байт	Діюче значення струму	МПСК
2.	V	1 байт	Швидкість об'єкту	МПСК
3.	P	1 байт	Потужність електроприводу	МПСК
4.	I_d	1 байт	Активний струм на вході інвертора напруги	МПСК
5.	U_d	1 байт	Напруга мережі живлення	МПСК
6.	$N_{\text{км}}$	4 біт	Номер позиції контролера	ПК
7.	$F_{\text{рух}}$	1 біт	Режим «Рух»	ПК
8.	$F_{\text{гальм}}$	1 біт	Режим «Гальмування»	ПК
1	2	3	4	5
9.	$F_{\text{вибіг}}$	1 біт	Режим «Вибіг»	ПК
10.	F_v	1 біт	Рух «Вперед»	ПК
11.	F_n	1 біт	Рух «Назад»	ПК
12.	$F_{\text{ін}}$	1 біт	Команда на включення інвертора напруги	ПК

9. Елементи системи керування

В якості датчиків частоти обертання електродвигуна можна використовувати датчики типу НІА фірми HEINZMANN або типу KMG-2H фірми «Красс Маффай». Вказані датчики імпульсів призначені для безконтактного сприйняття параметрів руху зубчатого колеса або зубчатої рейки.

Для прикладу розглянемо датчик типу KMG-2H.

За імпульсами напруги, що одержані на виході датчика, можна судити про число оборотів, швидкість руху і прискорення, а завдяки вбудованій в датчик другій сприймаючій системі - напрям обертання і напрям поступального руху. Як перша, так і друга система діють аж до моменту абсолютного спокою. Для обох систем нижня межа частоти обертання складає 0 Гц. Системи мають

однакове конструктивне виконання, працюють від одного загального джерела електроживлення і можуть взаємно контролюватися в процесі експлуатації.

Кожна з двох сенсорних систем датчика виконана на магнітних чутливих елементах, розташованих на одному загальному для двох систем постійному магніті і включених за диференціальною схемою. Сенсорні системи сприймають зміни параметрів магнітного поля, що вносяться зубчатим колесом при його русі. Конструктивні параметри датчика вибрані так, щоб при модулі зубчатого колеса, що дорівнює 2, на обидва виходи поступали сигнали зі зсувом за фазою один щодо одного на 90° . Для забезпечення необхідної перешкодостійкості, кожний з двох вихідних сигналів подається спочатку на схему запуску з операційним підсилювачем на виході.

Вихідний сигнал стійкий до коротких замикань і має певний залишковий рівень імпульсу (відмінний від нуля), завдяки чому правильність функціонування електронного вузла може перевірятися за сигналом на його виході не тільки в режимі видачі імпульсів, але і в режимі спокою. Для перевірки застосовують зовнішній електронний пристрій. Тим самим забезпечують можливість розпізнавання обриву, короткого замикання або шунтування в сполучній лінії датчика.

Обидві сенсорні системи, а також електронний блок розміщуються в міцному, захищеному від корозії металевому патрубку з фланцем, що дозволяє застосовувати їх в несприятливих умовах навколишнього середовища.

Технічні характеристики датчика імпульсів KMG-2H:

Характеристика / показник	Дані / Виконання
Конструктивне виконання	подвійна система в металевому корпусі
Ступінь захисту згідно з МЭК 529 (EN 606 /28 /YDE 170 частина 1)	IP65 (тільки з відповідним штекером і сполучним кабелем)
Електричне з'єднання	гнучкий екранований кабель, 4x AWG (американський сортамент дротів) 20 з

	вільним кінцем; стандартна довжина 2м; екран з'єднується з корпусом і фланцем.
Маса	не більше 0,29 кг (разом із стандартним кабелем)
Діапазон температур	-40°... +100°C
Принцип дії чутливого елемента	магнітна диференціальна сенсорна система
Квантуючий елемент	феромагнітний ротор (зубчате колесо або зубчата рейка); модуль 2 з певними обмеженнями; можливі інші модулі
Контрольовані величини	число оборотів швидкості руху; пройдений шлях; кут повороту 0,1....1,5мм
Відстань від датчика до квантуючого елемента або допустимий повітряний зазор при модулі 2	номінальна відстань 0,8мм, допуск $\pm 0,7$ мм
Робоча напруга	$U_0=15$ В пост. струму ± 20 % (12 В пост. струму, 18 В пост. струму).
Струм споживання без навантаження	не більше 33мА, звичне 22мА
Струм навантаження на виході кожної системи	не більше 10мА
Компоновка системи	з двотактним задаючим пристроєм
Внутрішній опір системи	не більше 50Ом
Вихідний сигнал	прямокутні імпульси; коефіцієнт заповнення періоду імпульсів 1:1; інтервал допуску залежить від форми зубів ротора
Крутизна фронту	15 мкс \pm 10мкс

Нижній рівень імпульсу	+2.0V \pm 10% (щодо 0 V)
Верхній рівень імпульсу	Ur-(1,6V \pm 40%)
Діапазон частот	
нижня межа частоти	система 1 0Гц система 2 0Гц
верхня межа частоти	система 1 20 000 Гц система 2 20 000 Гц
Захист від впливу зовнішніх електричних полів	екранування каналів передачі вихідних сигналів, коаксіальний екран, що з'єднується з корпусом і фланцем датчика
Допустимий рівень електричних перешкод	20В/м (згідно з МЭК 1000-4-5)
Допустимий рівень магнітних перешкод	10 кА/м (для магнітних полів постійного і змінного струму)
Електрична міцність ізоляції	1 кВ пост. струму (між електронним блоком і корпусом датчика)
Допустиме механічне навантаження	Згідно з EN 80008
Вібрація	30 q, середньоквадратичне значення 100 Гц уздовж осей X Y Z

Характерні особливості

Можливість поточного контролю	забезпечується прийнятими нижнім і верхнім рівнями імпульсів і виробляється шляхом порівняння сигналів двох систем, починаючи з 0 Гц
Стійкість при коротких замиканнях	датчик відрізняється стійкістю до коротких замикань
Захист від зміни полярності	датчик володіє абсолютною стійкістю до зміни полярності

Можливість поточного контролю в стані спокою (при $v = 0$ м/с)

забезпечується зовнішнім електронним пристроєм

Розпізнавання напрямку обертання (починаючи з $v = 0$ м/с)

можливо за допомогою зовнішнього електронного пристрою

Датчик КМГ-2Н має стандартне конструктивне виконання (рис. 9.1, рис. 9.2).

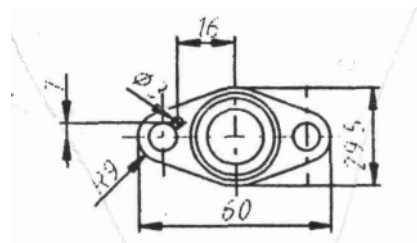


Рис. 9.1 – Датчик КМГ-2Н (вид знизу)

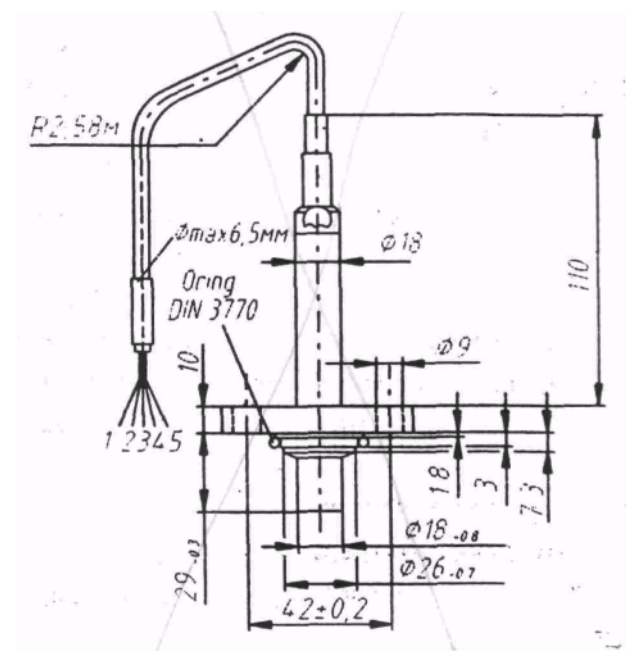


Рис. 9.2 – Датчик КМГ-2Н (вид збоку)

Найменший допустимий радіус вигину кабелю складає 25 мм.

Сполучний кабель 1хАWG (американський сортамент дрітів) згідно з нормами MIL- W- 81044. Екран: мідь оцинкована. Кожух: радокс, еластомір чорний. Діаметр кабелю 5,2 мм.

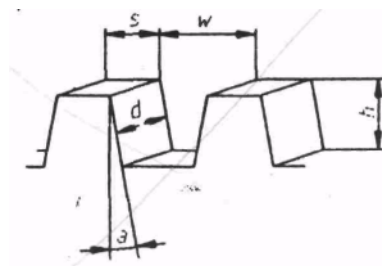
Стандартна довжина кабелю - 2 м.

Розмітка живильного кабелю:

1. Плюс (+) - оранжевий колір;
2. Мінус (-) - зелений колір;
3. 1-й сигнал - синій колір (система 1);
4. 2-й сигнал - білий колір (система 2);
5. Екран - чорний колір з'єднань з корпусом.

Ротор для датчика імпульсів

Форма зуба ротора (рис. 9.3) для датчика імпульсів (квантуючого колеса) виконує другорядну роль. Але оптимальними є такі розміри:



- товщина зуба $s = 2,8\text{ мм}$
- ширини впадини між зубами $w = 3,5\text{ мм}$;
- висота зуба $h = 4\text{ мм}$;
- кут профілю $d = 10^\circ \pm 10^\circ$;

Рис. 9.3 – Форма зуба ротора

- диск ротора повинен мати товщину не менше 20 мм, але при спеціальному юстируванні він може бути тоншим на 2 мм.

У стандартному варіанті форма зуба квантуючого колеса має евольвентний профіль. Ніяких утруднень не виникає при застосуванні циліндрових, плоских, конічних зубчатих і косозубих коліс. При цьому необхідно мати на увазі, що подовжня вісь фланця завжди повинна розташовуватися перпендикулярно до профілів зубів або паралельно диску зубчатого колеса.

Конструкція датчика імпульсів КМГ - 2Н розрахована на модуль зубчатого колеса, що дорівнює 2. Тим самим, відстань між зубами фіксується і дорівнює 6,28 мм.

Електричне зміщення фаз між першою та другою системами складає при цьому $90^\circ \pm 30^\circ$. Допустимий зазор лежить в межах від 0 до 1,5 мм і, звичайно, приймають його як таким, що дорівнює $0,8\text{ мм} \pm 0,7\text{ мм}$

Вимірювальний перетворювач напруги типу ПИНТ-1 призначений для гальванічної розв'язки й перетворення первинного сигналу напруги в пропорційний сигнал на виході з рівнем, що достатній для послідууючої обробки в колах керування й регулювання електроприводу. Перетворювач

може експлуатуватися в довготривалому режимі при параметрах, що не перевищують номінальні.

Технічні характеристики перетворювача вимірювання напруги:

Кількість входів	-	3.
Номінальне значення вхідної напруги:		
- на вході 1, мВ	-	75
- на вході 2, В	-	150
- на вході 3, В	-	1000

При підвищенні вхідної напруги на входах 1, 2, 3 на 10% від номінальної характеристики вхід-вихід зберігаються.

Зміна амплітуди вхідної напруги в діапазоні частот від постійного струму до 2000 Гц:

- на вході 1, мВ	-	- 75... +75
- на вході 2, В	-	-150...+150
- на вході 3, В	-	-1000...+1000.

Номінальна напруга на виході (середнє значення) при номінальній напрузі на вході, В:

- 1 варіант	-	5
- 2 варіант	-	8
Основна приведена похибка (не більше, %)	-	±1,0

Додаткова приведена похибка по кожному фактору вимог експлуатації

(температура, вологість, зовнішнє електричне поле), не більше, % ±1,0

Опір навантаження перетворювача (не менше, Ом) 1000

Ізоляція вхідних і вихідних кіл перетворювача між собою і відносно корпусу витримує випробувальну напругу, кВ - 2,0

Напруга живлення, постійна (середнє значення), В - +15±1
-15±1.

Загальна точка джерела живлення гальванічно з'єднана з виходом перетворювача.

Потужність, що споживається від джерела живлення, не більше, Вт - 4,0

Режим роботи перетворювача - довготривалий.

Вхідний опір перетворювача:

- на вході 1, кОм - $0,1 \pm 0,5\%$

- на вході 2, кОм - $200,1 \pm 0,5\%$

- на вході 3, кОм - $1333 \pm 1\%$

Маса пристрою, не більше, кг - 2,5

Список літератури

1. М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, І.Б. Клепіков та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навчальний посібник / За ред. М.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. – К.: «Либідь». – 2005. – 680 с.
2. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560с.
3. Теорія електропривода./ За ред. М.Г. Поповича. – К.: Вища школа. – 1993 – 494с.

ТИПОВЕ ЗАВДАННЯ НА ПРОЕКТУВАННЯ

Варі- ант	$P_{\text{пит}},$ кВт/кН	n, шт	$i_{\text{ред}}$	m, т	$V_{\text{max}},$ км/год	G, кН	$a_{\text{max}},$ м/с ²	$D_{\text{к}},$ м	W, кН	Ud, В	Iф, А	$\eta_{\text{ред}}$	$\eta_{\text{інв}}$	$\eta_{\text{дв}}$	$Z_{\text{рот}},$ шт.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	12	4	10,3	34,1	90	320	1,2	0,785	1,40	820	200	0,85	0,97	0,91	72
2	11,5	4	7,43	18,1	70	170	1,5	0,700	1,20	600	150	0,83	0,95	0,88	64
3	11	4	10,5	33,9	90	325	1,3	0,785	1,45	800	190	0,85	0,97	0,89	68
4	10,5	2	11,4	11,5	75	100	1,4	1,070	1,25	580	180	0,82	0,93	0,87	70
5	10,8	2	11,2	11,7	70	100	1,3	1,070	1,2	560	195	0,82	0,94	0,88	64
6	11,2	4	10,7	34,3	90	315	1,2	0,785	1,35	790	210	0,85	0,97	0,90	72
7	11,7	4	7,47	18,3	75	168	1,6	0,700	1,3	550	175	0,83	0,95	0,88	68
8	12,2	2	11,5	11,9	70	120	1,4	1,070	1,20	560	185	0,82	0,93	0,87	64
9	10,3	4	10,9	34,5	90	325	1,3	0,785	1,40	780	215	0,85	0,97	0,89	70
10	10,7	2	11,3	11,8	75	100	1,4	1,070	1,15	540	195	0,8	0,94	0,88	64
11	11,8	4	7,41	18,5	70	172	1,6	0,700	1,25	590	160	0,82	0,95	0,89	68
12	10	4	11,1	34,7	90	322	1,3	0,785	1,35	780	185	0,84	0,97	0,90	62

Продовження (додатка) – ТИПОВЕ ЗАВДАННЯ НА ПРОЕКТУВАННЯ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
13	12,2	4	7,42	18,7	75	171	1,5	0,700	1,20	560	170	0,83	0,95	0,88	64
14	10,9	2	11,1	11,6	70	101	1,4	1,070	1,1	540	180	0,81	0,93	0,87	68
15	10,2	4	10,4	34,9	90	322	1,2	0,785	1,40	810	205	0,85	0,97	0,91	72
16	10,4	4	7,47	18,4	75	172	1,7	0,700	1,30	590	155	0,83	0,95	0,88	64
17	11,4	2	11,7	11,3	70	102	1,4	1,070	1,15	530	175	0,82	0,93	0,87	68
18	10,1	4	10,6	34,6	90	324	1,3	0,785	1,35	770	195	0,85	0,97	0,89	70
19	12,1	4	7,43	18,2	75	175	1,5	0,700	1,20	620	170	0,83	0,95	0,88	64
20	11,7	2	11,9	11,5	75	104	1,4	1,070	1,10	610	195	0,81	0,94	0,87	68
21	11,3	4	7,47	18,6	70	173	1,5	0,700	1,15	615	160	0,84	0,95	0,88	64
22	12,4	4	10,8	34,7	90	325	1,2	0,785	1,40	800	210	0,85	0,97	0,91	70
23	11,6	2	11,7	11,4	65	104	1,4	1,070	1,10	590	185	0,82	0,93	0,88	64
24	10,9	4	7,41	18,8	65	173	1,5	0,700	1,15	650	175	0,83	0,95	0,89	68
25	12,5	4	10,5	34,4	90	321	1,3	0,785	1,35	800	210	0,85	0,97	0,90	72

Зміст

Вступ	6
1. Технічні вимоги до системи керування	8
2. Структурні схеми електроприводу	9
3. Статичні характеристики електроприводу	11
4. Структура системи керування	15
5. Опис роботи системи керування	17
6. Вибір регуляторів та розрахунок параметрів зворотних зв'язків	18
7. Алгоритми системи керування	24
8. Цифрові канали зв'язку	26
9. Елементи системи керування	28
Список літератури	35
Додаток	36

Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни "Системи керування електроприводами" (для студентів 4 курсу всіх форм навчання напряму підготовки 6.050702 – "Електромеханіка")

Укладачі: Олександр Вадимович Донець,
Юрій Сергійович Калиниченко,
Микола Іванович Шпіка.

Редактор: Д.Ф. Курильченко

План 2008, поз. 256 М

Підп. до друку 12.12. 2008 р.	Формат 60 x 84 1/16	Папір офісний.
Друк на ризографі.	Умовн.-друк. арк. 1,5	Обл.-вид. арк. 1,8
Зам. № 4697	Тираж 50 прим.	

Видавець і виготовлювач:
Харківська національна академія міського господарства,
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК №731 від 19.12.2001